

# Analyse de “Time-Lapse” stéréo pour la mesure de déformation 3D, application au suivi du glacier d’Argentière

H. Pham<sup>1</sup> H. He<sup>2</sup> F. Vernier<sup>1</sup> E. Trouvé<sup>1</sup> L. Benoit<sup>3</sup> L. Moreau<sup>2</sup> B. Girard<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LISTIC, Université de Savoie

<sup>2</sup> EDYTEM, Université de Savoie

<sup>3</sup> LOEMI, Institut Géographique National (IGN)

{Ha-Thai.Pham, Haixing.He, Flavien.Vernier, Emmanuel.Trouve, Blaise.Girard} @univ-savoie.fr,  
Lionel.Benoit@ign.fr, moreauluc@club-internet.fr

## Résumé

*L’observation de la Terre par des systèmes d’acquisition d’images permet le suivi des évolutions temporelles d’objets tels que les glaciers, les glissements de terrain, les volcans... Différentes techniques d’observation existent dont la photogrammétrie terrestre qui est en plein essor. Cet article présente une chaîne de traitement adaptée au suivi d’objets géophysiques dans des conditions terrain peu favorables à la photogrammétrie. Les premières étapes sont illustrées sur des séries temporelles d’images stéréoscopiques acquises par deux appareils photo automatiques installés sur la rive droite du glacier d’Argentière afin de reconstruire le relief et mesurer son déplacement en 3D. Les premiers résultats sont validés à travers une expérimentation menée en collaboration avec l’IGN à l’automne 2013.*

## Mots Clefs

Séries temporelles d’images, « time-lapse », photogrammétrie, déplacement, surveillance de glacier

## Abstract

*The Earth observation by image acquisition systems allows the monitoring of temporal evolutions of objects such as glaciers, volcanoes ... Different observation techniques exist including terrestrial photogrammetry which is booming. This paper presents a processing chain suitable for monitoring geophysical objects in difficult conditions for ground photogrammetry. The first steps are illustrated on time series of stereoscopic images acquired by 2 automatic cameras installed on the right bank of the Argentiere glacier to build elevation models and to measure its displacement in 3D. The first results are validated through an experiment conducted in collaboration with IGN in fall 2013.*

## Keywords

Image time series, time-lapse, photogrammetry, displacement, glacier monitoring

## 1 Introduction

L’observation de la Terre par des données de télédétection satellitaires, aéroportées ou proximales, permet d’analyser des changements de surface de type géomorphologique, sismique ou volcanique, ou de suivre l’évolution de zones urbaine, végétale ou glaciaire... Dans cet article, nous présentons une chaîne de traitement dédiée à l’analyse de séries temporelles d’images stéréoscopiques, développée dans le contexte de l’observation des glaciers Alpins. Plusieurs raisons poussent à développer de tels systèmes d’acquisition et de traitement dans ce contexte difficile. D’une part, les glaciers sont des réserves naturelles d’eau douce et leurs torrents glaciaires sont également utilisés pour la génération d’hydro-électricité. D’autre part, ils sont des indicateurs du changement climatique de par leur changement de taille, le recul ou l’avancée des glaciers étant liés aux précipitations et aux périodes climatiques chaudes ou froides. Enfin, selon leur configuration, ils peuvent présenter des risques pour les populations demeurant en aval des vallées glaciaires. Le décrochement de glacier ou la purge brutale de poche d’eau sous-glaciaire ont, par le passé, généré d’importantes laves torrentielles dévastant tout sur leur passage (Saint-Gervais, 12 juillet 1892, 200 morts).

Les données utilisées pour l’observation de la Terre vont des images satellitaires optiques ou radars à synthèse d’ouverture (SAR) aux mesures terrains obtenues par GPS, laser ou photographie terrestre. Chacun de ces systèmes a des avantages et des limites : les systèmes satellitaires apportent une très grande couverture des zones observées au détriment de la précision. À l’opposé, les mesures in situ de type GPS offrent une très grande précision de mesure, mais en des points isolés de la zone étudiée. Des systèmes intermédiaires de type « laser scan » ou photogrammétrie sont également des solutions fréquemment utilisées. Ces dernières peuvent apporter une plus grande précision que le satellitaire et une plus grande couverture que le GPS. Pour des raisons naturelles de coût et de facilité de mise en

œuvre, les techniques photogrammétriques sont de plus en plus utilisées.

Parmi les méthodes photogrammétriques, l'utilisation d'un seul appareil photo permet d'observer, grâce à l'acquisition de séries d'images, des déplacements en 2 dimensions (2D) dans le plan image [1], [2]. Cette technique est facile à mettre en œuvre et elle peut se faire par l'installation d'un appareil photo de terrain programmé pour des prises de vue périodiques, des « time-lapse ». L'apport de la stéréovision par l'installation d'un second appareil photo de terrain permet l'observation en trois dimensions (3D). Les variations de volume (chute de séracs, ablation...) peuvent être mesurées ainsi que les 3 composantes (Est, Nord, Vertical) de champs de déplacement. Pour améliorer la précision 3D, des techniques de multivues (avec plusieurs points de vue) sont également envisageables. Cependant, ces dernières nécessitent le plus grand nombre de points de vue possible, et ceux-ci peuvent difficilement être couverts par des appareils photo de terrain automatiques.

## 2 Exploitation de séries temporelles d'images

La répétition dans le temps des acquisitions sous des angles identiques ou quasi identiques (images acquises depuis un point fixe, données satellitaires acquises sur des orbites répétées...) permet d'utiliser les séries temporelles d'images à différentes fins.

En l'absence de changement, un premier objectif consiste à exploiter la redondance de l'information, soit pour améliorer la résolution spatiale (super-résolution), soit pour réduire un bruit de nature aléatoire alors que le signal est supposé constant ou avoir une évolution déterministe qui peut être modélisée et corrigée par la calibration des données. Selon la nature du bruit (additif ou multiplicatif), sa distribution et la corrélation entre les dates, différents types de filtres multi-temporels peuvent être envisagés [3]. Le résultat attendu est une image dont le bruit a été fortement réduit tout en limitant la perte de résolution spatiale grâce à l'utilisation de voisinages spatio-temporels, voire purement temporels si le nombre de dates est suffisant.

Un second objectif fréquemment rencontré est la détection de changements entre deux dates ou au sein d'une série d'images [4]. La notion de changement est étroitement liée à l'application et les méthodes à la nature des données. Les changements d'éclairage pour les données optiques, ou d'état de surface et les angles légèrement différents pour les données radar, peuvent rendre cette tâche difficile et nécessiter des chaînes complexes de traitement (extraction d'attributs de changement, classification supervisée...). Le résultat attendu est une carte de changement binaire (détection) ou m-aire (identification) lorsque différents types de changements ou d'évolutions temporelles sont discriminés. Un troisième objectif très présent en observation de la Terre est la mesure de déformation de surface à des fins d'évaluation du risque (subsidence urbaines, glissement de terrain...) ou de suivi et modélisation de phénomènes géophy-

siques tels que les failles ou les volcans.

Les problèmes rencontrés sont relativement génériques :

- recalcr les données avec le choix entre différentes approches : i) l'approche « *common master* » avec la sélection d'une image de référence sur laquelle la série est recalée, ii) l'approche «  $(T, T + 1)$  » où les couples sont formés de proche en proche entre images successives, iii) l'approche « réseau » avec la formation d'un ensemble redondant de couples favorables, suivie d'une inversion pour reconstruire une série chronologique de déplacements [5],
- mesurer des offsets entre chaque couple d'images en se heurtant à la présence de bruit, au manque de texture et aux évolutions temporelles qui rendent difficiles les appariements ou la recherche d'un maximum de similarité,
- corriger ces cartes d'offset des décalages géométriques dus aux conditions d'acquisition (erreur de recalage, effet du relief, perturbations atmosphériques...),
- transformer ces mesures de déplacement « image » en déplacement « physique » (2D métrique, géolocalisé),
- reconstruire le déplacement 3D (Est, Nord, Vertical) lorsque plusieurs sources sont disponibles (séries de couples stéréo, données radar issues d'orbites ascendantes et descendantes...).

Les travaux présentés dans cet article s'inscrivent dans cet objectif et sont illustrés sur une application spécifique : la mesure du déplacement de glacier par photogrammétrie terrestre. L'approche « *common master* » a été retenue en raison de la faible évolution temporelle sur la période d'observation.

## 3 Mesure de déplacement

Dans le cas de séries d'images acquises dans des conditions naturelles, la mesure de déplacement nécessite des prétraitements. Les conditions climatiques (température, vent, pluie...) font que les appareils photo bougent. Ceci influe sur les séries d'images et oblige à les recalcr.

### 3.1 Sélection et recalage

L'approche « *common master* » nécessite de choisir une image de référence sur laquelle la série d'images sera recalée. Dans l'approche proposée, nous faisons le choix de prendre l'image qui minimise la somme des distances de recalage avec les autres images.

Sur les  $N$  images dans chaque série,  $K$  imagerietes sont découpées sur des zones fixes (les montagnes autour du glacier pour l'application traitée). Ces imagerietes ont pour objectif de calculer le décalage entre chaque image et définir les points de référence pour le recalage. Les décalages entre chaque date d'une imageriette  $k$  sont calculés par une méthode de corrélation, puis regroupés dans des matrices  $Dx^k$  et  $Dy^k$  correspondant respectivement aux décalages

en colonnes et en lignes :

$$Dx^k = \begin{pmatrix} dx^k(1,1) & \cdots & dx^k(1,N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ dx^k(N,1) & \cdots & dx^k(N,N) \end{pmatrix}$$

La valeur  $dx^k(n, m)$  représente, sur l'imagette  $k$ , le décalage en colonne de l'image  $m$  par rapport à l'image  $n$ . Pour chaque imagette  $k$ , les distances entre les couples d'images  $(n, m)$  sont alors calculées :

$$d^k(n, m) = \sqrt{dx^k(n, m)^2 + dy^k(n, m)^2}$$

On peut ainsi chercher l'image « médiane » qui minimise la somme des distances aux autres images :

$$d_{min}^k = \min_n \left( \sum_m d^k(n, m) \right), \quad (1)$$

$$n_{ref}^k = \operatorname{argmin}_n \left( \sum_m d^k(n, m) \right).$$

Les distances  $d^k(n, m)$  dépendant de l'imagette  $k$ , l'image de référence recherchée n'est pas forcément la même selon l'imagette utilisée. Le choix va donc se porter sur l'image  $n_{ref}$  qui apparaît le plus fréquemment comme image de référence :

$$n_{ref} = \operatorname{mode}_k(n_{ref}^k),$$

où  $\operatorname{mode}$  est la valeur modale du vecteur constitué des  $n_{ref}^k$ , c'est-à-dire l'indice de l'image qui apparaît le plus souvent comme référence. En cas d'égalité, s'il y a plusieurs images de référence possibles, les valeurs données par l'équation (1) seront discriminantes.

Ces résultats donnent également pour chaque image, les points d'intérêts relatifs à l'image de référence  $n_{ref}$ . Soit  $(x^k, y^k)$  le point au centre de l'imagette  $k$ . Les positions  $P^n$  des points d'intérêts sur l'image  $n$  sont alors données par :

$$P^n = \begin{pmatrix} x^1 + dx^1(n_{ref}, n), y^1 + dy^1(n_{ref}, n) \\ \vdots \\ x^k + dx^k(n_{ref}, n), y^k + dy^k(n_{ref}, n) \\ \vdots \\ x^K + dx^K(n_{ref}, n), y^K + dy^K(n_{ref}, n) \end{pmatrix}.$$

Ces points d'intérêts sont ensuite utilisés pour la détermination d'une transformation de recalage.

Les matrices  $Dx^k$  et  $Dy^k$  étant théoriquement antisymétriques, une estimation des erreurs pour chaque imagette  $k$  dans chaque image  $n$  est donnée par :

$$Err_n^k = \sum_m (dx^k(n, m) + dx^k(m, n))^2 + \sum_m (dy^k(n, m) + dy^k(m, n))^2.$$

Ces valeurs permettent d'écarter certaines imagettes sur certaines images, voire des images entières qui ne seraient

pas utilisables en raison notamment de conditions météorologiques. Une estimation de l'erreur de recalage pour une image  $n$  est alors donnée par :

$$Err_n = \sum_k Err_n^k.$$

La mise à l'écart d'imagettes ou d'images entières nécessite naturellement la détermination d'un seuil d'erreurs. Après la détermination des points d'intérêts, chaque image est recalée sur l'image de référence. Il existe dans la littérature un certain nombre de méthodes pour recaler des images [6]. Dans un premier temps, nous nous limitons à déterminer la matrice de transformation  $M$  telle que :

$$p' = M.p,$$

où le point  $p$  sur l'image à recaler est l'homologue de  $p'$  sur l'image de référence. La matrice  $M$  peut être contrainte à une transformation affine de type RST (*Rotation, Scale, Translation*) ou modéliser une transformation homographique.

### 3.2 Combinaison de l'information de déplacement et de profondeur

L'utilisation de séries temporelles de couples stéréoscopiques permet d'exploiter conjointement la dimension temporelle des données et leur dimension photogrammétrique, illustrées respectivement en bleu et en rouge sur la figure 1.

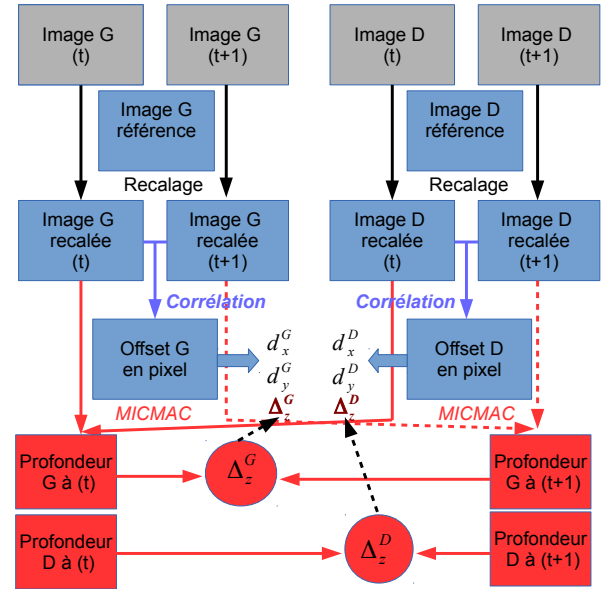


FIGURE 1 – Combinaison de l'information de déplacement et de profondeur.

Les images ayant été recalées, la mesure du déplacement des zones mobiles dans la série d'images peut être effectuée. Cette opération est réalisée à l'aide d'un outil de corrélation dense [7] provenant de la suite EFIDIR Tools, ap-

pliqué à l'ensemble de l'image. Le résultat exprime le déplacement en pixel des zones mobiles et l'erreur résiduelle de recalage des zones fixes.

Afin d'obtenir une mesure métrique, l'information de profondeur (distance entre l'appareil et les points de l'image) doit être connue. L'utilisation d'une installation stéréoscopique permet de résoudre ce problème. Ces résultats sont obtenus, en collaboration avec l'IGN, à l'aide du logiciel MICMAC [8], [9]. Ce dernier fournit directement une projection du MNT dans le plan photo, ce qui, en connaissant la position de l'appareil photo, permet de calculer la carte de profondeur en mètre.

La chaîne de traitement complète est illustrée par la figure 1. Les traitements selon la dimension temporelle donnent pour chaque série d'images, des séries de déplacements 2D gauches et droites avec différents intervalles de temps. On obtient ainsi 4 projections des déplacements 3D : 2 projections sur les axes (ligne/colonne) de l'image gauche et 2 sur ceux de l'image droite. Les traitements selon la dimension photogrammétrique donnent quant à eux 2 séries temporelles de modélisation 3D de l'environnement. Ces 2 séries sont respectivement relatives aux points de vue gauche et droit et fournissent l'information de profondeur nécessaire à la mesure. La fusion, avec une technique de moindres carrés par exemple, des différentes projections de déplacement permet d'obtenir le déplacement 3D du glacier. Notons également que dans cette chaîne, les modèles 3D gauche et droit sont calculés, l'objectif n'est pas tant d'obtenir ces modèles que de calculer les cartes de profondeurs métriques afin d'obtenir un déplacement en mètre du glacier selon les deux points de vue.

#### 4 Expérimentation menée sur le glacier d'Argentière

Les appareils photo numériques automatiques utilisés pour l'observation du glacier d'Argentière sont situés sur la rive droite du glacier à 2631 et 2683 m (séparés d'une base de 158,6m). Ils ont été installés pour la première fois le 26/11/2012 en collaboration entre les laboratoires LISTIC, EDYTEM et ISTerre dans le cadre du projet Mont-Blanc (Université de Savoie). Ce dispositif entièrement automatisé est basé sur des appareils photo numériques DMC-LX 4 de marque Leica. Il s'agit de deux appareils compacts HD possédant 10.4 millions de pixels. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 1.

Caractéristiques des appareils	
Nombre de pixels	10M
Taille d'image	3776 x 2520
Angle d'ouverture	$2.7 \times 10^{-4} \text{ rad/pixel}$

TABLE 1 – Appareils photo numériques automatiques HR installés sur la rive droite du glacier d'Argentière.

Dans la configuration actuelle, ils acquièrent 5 photos sté-

réoscopiques par jour de 9 h à 21 h avec un intervalle de 3 h. Ils permettent d'observer une surface glaciaire d'environ 1km<sup>2</sup> incluant la chute de séracs de Lognan.

Une campagne d'expérimentation sur ce glacier a été effectuée du 13 septembre au 8 octobre 2013 en collaboration avec l'IGN. L'objectif était de mesurer le déplacement du glacier par GPS et photogrammétrie. Pour effectuer ces mesures, un réseau de Géocubes (instrument GPS) et un ensemble de cônes géoréférencés ont été installés sur les bords et sur le glacier. Les Géocubes donnent une vérité terrain en plusieurs points et les cônes ont le rôle de points de référence et recalage pour la photogrammétrie.

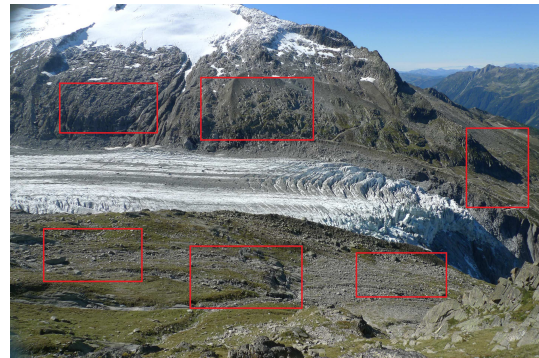


FIGURE 2 – Images de la série gauche avec localisation des 6 imagerie choisies, 20/09/2013.



FIGURE 3 – Images de la série gauche du 26/09/2013 mettant en évidence les changements de luminosité dans la série temporelle.

La figure 2 présente les positions des 6 imagerie choisies pour le recalage sur la série temporelle gauche. Ces imagerie ont été placées arbitrairement, proches et de part et d'autre de la zone d'intérêt : le glacier. La figure 4 illustre la position des appareils photo, leur angle de vue et un des Géocubes que nous utilisons comme référence. Ce Géocube est au centre du réseau de Géocubes et à équidistance des bords du glacier.

#### 5 Résultats expérimentaux

L'expérimentation menée a fourni 2 séries d'images. Les premiers résultats présentés ci-après concernent 20 images



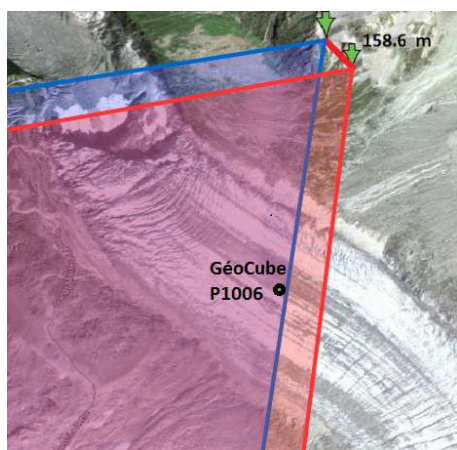


FIGURE 4 – Appareils photo automatiques installés sur la rive droite du glacier d’Argentière et positionnement d’un des Géocubes.

acquises à 12h entre le 19 septembre et le 08 octobre 2013.

### 5.1 Choix de l’image de référence et recalage

La première étape du recalage consiste à choisir une image de référence pour recalcr toutes les autres sur sa géométrie. En appliquant l’algorithme donné en section 3.1, nous obtenons les résultats présentés dans le tableau 2.

Imagette	1	2	3	4	5	6	Image de référence
Gauche	20	10	5	7	10	5	10
Droite	15	10	13	20	18	10	10

TABLE 2 – Détection de l’image « médiane » en fonction des imagettes et choix de l’image de référence

Concernant les images droites, il n’y a pas d’ambiguïté, l’image 10 sort 2 fois sur 6 comme image de référence. Quant aux images gauches, l’algorithme donne, selon les imagettes, soit l’image 5 soit l’image 10 comme image de référence. Pour des raisons de cohérence avec la série droite, l’image 10 a été choisie.

Nous noterons que cette détermination n’est pas absolue ce qui peut entraîner « l’élection » de plusieurs images de référence. Dans le cas des séries étudiées, les images de référence choisies ne sortent pas majoritairement et un critère supplémentaire a été utilisé.

### 5.2 Déplacement 2D

Comme présenté en section 3, le calcul du déplacement est effectué après recalage des séries d’images. Les figures 5 et 6 représentent respectivement le déplacement (en mètre) mesuré à 1 et 5 jours d’intervalle, entre le 19/09/2013 et le 20/09/2013 et entre le 19/09/2013 et le 23/09/2013. Ces résultats mettent en évidence le déplacement du glacier et sont cohérents : le glacier se déplace vers la droite de l’image conformément à la pente. On observe également

une accélération du glacier sur la partie droite de l’image, qui correspond à la chute de séracs où les séracs accélèrent avant de tomber.

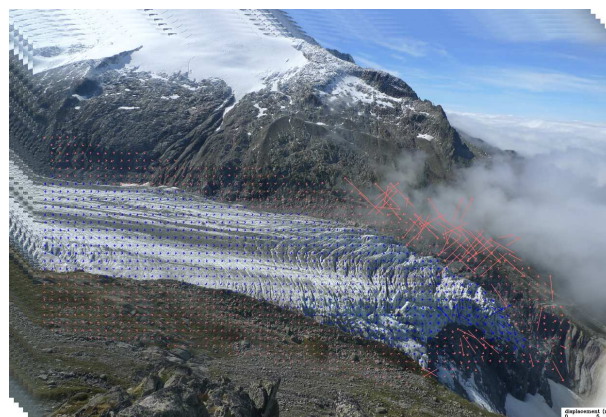


FIGURE 5 – Déplacement en mètre du glacier entre le 19/09/2013 et le 20/09/2013 sur la série droite

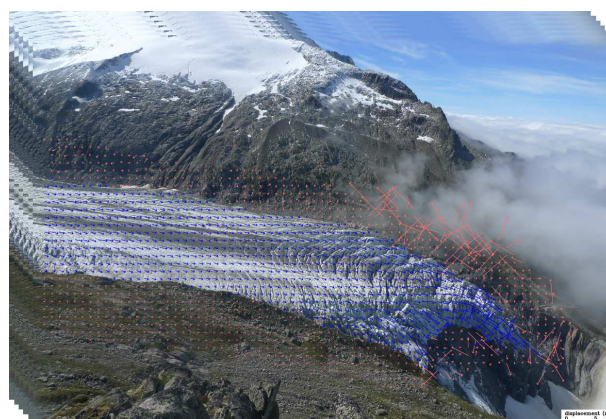


FIGURE 6 – Déplacement en mètre du glacier entre le 19/09/2013 et le 23/09/2013 sur la série droite

Les figures mettent en évidence un déplacement homogène au niveau des montagnes qui est dû à l’erreur résiduelle après recalage des images et dépend de la fonction de recalage utilisée. La zone centrale de l’image comporte peu d’erreurs car les points de recalage sont centrés sur cette zone, alors que les zones montagneuses périphériques présentent plus d’erreurs. Afin de renforcer la mesure, le calcul du déplacement est effectué pour différents intervalles de temps  $(T, T + 1)$ ,  $(T, T + 2)$ ,  $(T, T + 3)$ ... Ceci permet de rendre les mesures plus robustes. D’une part, le déplacement est plus important par rapport aux incertitudes de recalage : l’erreur résiduelle à 1 jour peut être du même ordre de grandeur que le déplacement recherché (cf. figure 5). D’autre part, la redondance entre ces couples permet de recalculer les déplacements et positions journalières du glacier par une méthode d’inversion intégrant l’ensemble des mesures (approche réseau).

### 5.3 Comparaison des résultats photogramétriques et GPS

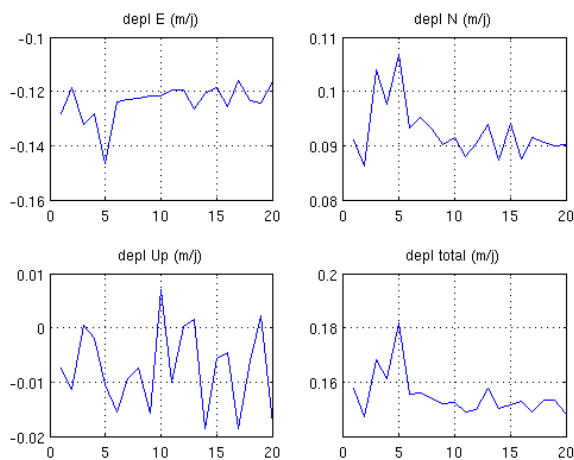


FIGURE 7 – Vitesse en mètre par jour du GéoCube 1006 obtenue par son GPS interne.

La campagne de mesure effectuée sur le glacier d'Argentièrre à l'automne 2013 a permis d'acquérir pendant 55 jours des données GPS continues et des couples stéréos toutes les trois heures. Il est donc possible de comparer les résultats de déplacement obtenus par les séries d'images avec les vérités terrains fournies par les GPS. Les déplacements GPS (en m/j) du GéoCube 1006 (voir figure 4) sont illustrés figure 7. Ils peuvent être comparés avec ceux obtenus à partir des photos (en mètre), donnés par la figure 8. Ces derniers sont obtenus après correction de l'erreur de recalage par interpolation linéaire entre l'erreur résiduelle en un point rive gauche et un autre point rive droite. L'axe  $x$  de l'image étant orienté approximativement dans la direction Nord-Ouest, un déplacement positif en  $x$  sur l'image correspond dans les données GPS à un déplacement négatif dans la composante Est et positif dans la composante Nord. La décélération, entre les jours 1 et 2 suivi d'une accélération s'observent sur les 2 jeux de mesures : en  $x$  sur l'image et en Est et Nord sur le GPS. Au delà du 7<sup>ème</sup> jour, une décélération progressive s'observe également sur les jeux de mesures et à partir du 11<sup>ème</sup> jour les changements de vitesse – accélérations et décélérations – sont identiques. Au 7<sup>ème</sup> jour d'observation, c'est à dire entre les jours 7 et 8, les résultats obtenus par photo donnent une vitesse négative, ce qui est incohérent. Ceci est dû à un fort changement de luminosité entre ces deux jours, les jours précédents étaient clairs et un couvert nuageux s'est installé à partir du 8<sup>ème</sup> jour (cf. figures 2 et 3). Cette observation est identique sur les 2 séries d'images droite et gauche. Le cas le plus critique intervient au 17<sup>ème</sup> jour où l'observation par photo n'est plus possible, des nuages se sont installés dans la vallée et empêchent l'acquisition de photos utilisables. Les résultats donnés par la figure 8 montrent qu'il n'y a quasiment pas de déplacement selon l'axe  $y$ . Ils sont de

l'ordre de grandeur de l'erreur résiduelle. Ils apportent cependant une information utile : les résultats qu'ils donnent à partir de la prise en compte du 17<sup>ème</sup> jour sont incohérents et montrent que l'image du 17<sup>ème</sup> jour est inutilisable. Pour finir, nous remarquerons que, bien que le mouvement

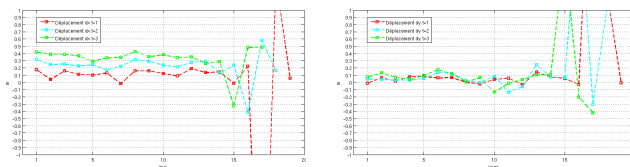


FIGURE 8 – Vitesse en mètre par jour de la zone du GéoCube 1006 calculée par corrélation d'images. Déplacement en  $x$  (à gauche) et en  $y$  (à droite) à 1, 2 et 3 jours d'intervalle.

soit correctement calculé par photogrammétrie lors des périodes observables – les changements de vitesse et l'ordre de grandeur des déplacements sont corrects – une erreur non négligeable reste présente entre les mesures GPS et le calcul par photogrammétrie.

## 6 Conclusion et perspectives

Nous avons présenté dans cet article une chaîne de traitement pour observer le déplacement d'objets géophysiques tels que le glacier d'Argentièrre à partir d'acquisitions stéréoscopiques issues d'appareils photo de terrain. Bien que les images aient été recalées, une erreur résiduelle reste présente et peut être importante comme dans le cas de fort changement de luminosité. Ces difficultés peuvent être imputées au choix d'appareils photo « grand public » et aux variations atmosphériques, dont les distorsions ne sont pas toujours bien corrigées par les modèles de recalage global. Des algorithmes de recalage plus poussés peuvent être étudiés, avec la difficulté de faire abstraction de la zone en déplacement qui occupe une partie importante de l'image. L'instrumentation et les traitements proposés permettent néanmoins de mesurer le déplacement du glacier sur une zone importante de crevasses et de chutes de séracs et de comparer ces résultats à des données GPS ponctuelles.

Nos travaux en cours portent sur l'utilisation de la redondance de mesures dans le temps, c'est à dire l'utilisation des calculs de déplacements entre les intervalles  $(T, T+1)$ ,  $(T, T+2)$ ,  $(T, T+3)$ ... afin de réduire l'erreur résiduelle et rendre la mesure plus robuste. Des premiers tests prometteurs nous ont permis, par une méthode d'inversion fréquemment utilisée en interférométrie radar, de réduire cette erreur. Néanmoins, la prise en compte des perturbations atmosphériques (nuages) dans le processus reste une problématique importante.

## Remerciements

Nous tenons à remercier les projets CNES TOSCA CESTENG, CNRS MASTODONS et Université de Savoie MONT-BLANC (2011, 2012) pour leur soutien à la réalisation de ces travaux.

## Références

- [1] R. Fallourd, F. Vernier, J.-M. Friedt, G. Martin, E. Trouvé, L. Moreau, and J.-M. Nicolas. Monitoring temperate glacier with high resolution automated digital cameras - application to the Argentière glacier. In *PCV 2010, ISPRS Commission III Symposium*, Paris, France, 5 pages, Sept. 2010.
- [2] Adrian N. Evans. Glacier surface motion computation from digital image sequences. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2) :1064–1071, 2000.
- [3] E. Trouvé, Y. Chambenoit, N. Classeau, and Ph. Bolon. Statistical and operational performance assessment of multitemporal SAR image filtering. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*, 41(11) :2519–2530, Nov. 2003.
- [4] A. Atto, G. Mercier, and D. Pastor. General framework on change detection in a sparse domain. In *IGARSS 2009 : IEEE International Geoscience & remote Sensing Symposium*, 2009.
- [5] F. Casu, A. Manconi, A. Pepe, and R. Lanari. Deformation Time-Series Generation in Areas Characterized by Large Displacement Dynamics : The SAR Amplitude Pixel-Offset SBAS Technique. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*, 99 :1–12, 2011.
- [6] B. Zitová and J. Flusser. Image registration methods : a survey. *Image and Vision Computing*, 21(11) :977–1000, 2003.
- [7] F. Vernier, R. Fallourd, J. M. Friedt, Y. Yan, E. Trouvé, J. M. Nicolas, and L. Moreau. Fast correlation technique for glacier flow monitoring by digital camera and space-borne sar images. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2011(11), 2011.
- [8] M. Pierrot-Deseilligny and N. Paparoditis. A multiresolution and optimization-based image matching approach : An application to surface reconstruction from spot5-hrs stereo imagery. *ISPRS Workshop On Topographic Mapping From Space (With Special Emphasis on Small Satellites)*, XXXVI-1/W41, 2006.
- [9] N Paparodits, J-P Souchon, G. Martinoty, and M Pierrot Deseilligny. High-end aerial digital cameras and their impact on the automation and quality of the production workflow. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (IJPRS)*, 60 :400–412, 2006.